

HUANG Feixiong, XIA Junming, YIN Cong, SUN Yueqiang, BAI Weihua, ZHAI Xiaochun, XU Na, CHEN Lin, HU Xiuqing. Sensitivity Analysis on the Retrieval of Significant Wave Height Using Fengyun-3E GNSS-R (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 353–363. CSTR:32142.14.cjss.2024-0093. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0093

风云三号 E 星 GNSS-R 反演有效 波高敏感性分析*

黄飞雄¹ 夏俊明¹ 尹 聪¹ 孙越强¹ 白伟华¹
翟晓春² 徐 娜² 陈 林² 胡秀清²

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国气象局国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 星载全球导航卫星反射遥感 (GNSS-R) 是一种利用导航卫星 L 波段信号前向准镜面反射的新型海洋遥感技术. 通过对比 GNSS-R 技术与其他微波遥感技术的异同, 在测量方法上提出了两种 GNSS-R 反演有效波高的技术路线. 一种为基于 GNSS-R 归一化时延波形前沿斜率的直接测量方法, 另一种为基于 GNSS-R 海面粗糙度的间接测量方法. 通过理论分析, 结合风云三号 E 星实测数据, 分析了两种方法的可行性和敏感性. 结果表明, 受限于当前体制下的 GNSS 信号带宽, GNSS-R 测距精度不足, 其波形前沿斜率对有效波高几乎无敏感性, 无法用于反演; GNSS-R 测量的海面粗糙度可以用于反演有效波高, 精度为 0.5~0.55 m, 虽然也存在一定的局限性, 但可作为一种获取有效波高数据的良好补充手段. 研究结果可为后续 GNSS-R 卫星任务的设计提供指导.

关键词 全球导航卫星系统反射遥感, 有效波高, 敏感性分析, 海面粗糙度

中图分类号 P714

Sensitivity Analysis on the Retrieval of Significant Wave Height Using Fengyun-3E GNSS-R

HUANG Feixiong¹ XIA Junming¹ YIN Cong¹ SUN Yueqiang¹
BAI Weihua¹ ZHAI Xiaochun² XU Na² CHEN Lin² HU Xiuqing²

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract The Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) is a new ocean remote sensing technique using L-band forward quasi-specular scattering navigation signals. After comparing the similarities and differences between GNSS-R and other microwave remote sensing techniques, two meth-

* 中国科协青年人才托举工程 (2023QNR001) 和风云卫星应用先行计划 (FY-APP-2022.0108) 共同资助

2024-07-29 收到原稿, 2024-08-27 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ods of retrieving Significant Wave Height (SWH) by GNSS-R are proposed: one is a direct method using the leading edge slope of the normalized delay waveform; the other is indirect based on the sea surface roughness measurement. The feasibility and sensitivity of the two methods are analyzed through theoretical model and actual measurements from Fengyun-3E data. The results show that due to the low ranging accuracy from GNSS signals bandwidth, the leading edge slope is almost insensitive to SWH, which cannot be used for retrieval; the sea surface roughness from GNSS-R can be used to retrieve SWH with an accuracy of about 0.5~0.55 m. Although it still has some limitations, it can be used as a good supplementary means to obtain SWH data. The results of this paper can also provide guidance for the design of future GNSS-R satellite missions.

Key words GNSS-R, Significant wave height, Sensitivity analysis, Ocean surface roughness

0 引言

全球导航卫星反射遥感 (Global Navigation Satellite System Reflectometry, GNSS-R) 是一种相对较新的遥感手段. 该技术利用全球导航卫星 (例如北斗、GPS、伽利略等) 在地球表面的反射信号, 可探测地球表面的物理参数, 例如海面风速、海面高度、土壤湿度、海冰参数等^[1]. 星载 GNSS-R 利用低轨卫星, 可以接收超过 100 颗导航卫星的信号, 具有信号源充足、全球覆盖的优势. 由于导航卫星发射的是 L 波段信号, 具有强穿透力, 不受云层和降水影响, 能提供全天时全天候观测. 另外, 由于 GNSS-R 将导航卫星信号作为一种机会信号, 载荷无须主动发射信号, 具有功耗小、体积小、重量轻等优势, 适合被小卫星搭载, 形成组网观测, 提供全球高时空分辨率观测数据. 在 GNSS-R 的各应用方向中, 对海面风速的探测最为成熟. 美国航空航天局于 2016 年发射的旋风全球导航卫星系统 (CYGNSS) 为 8 颗小卫星组成的星座, 可针对台风中心区域提供高频率的观测数据, 以提高台风路径和强度的预报精度^[2-4]. 中国 2021—2023 年发射的风云三号系列卫星 (FY-3E/F/G) 上搭载了 GNSS-R 探测仪 GNOS-II, 也实现了基于该技术的组网探测, 并首次实现了 GNSS-R 海面风速数据在数值天气预报模式中的业务化同化应用^[5]. 近年来发射的商业小卫星星座, 例如 SPIRE^[6]、天目一号等均标志着该技术已从科学研究阶段转向业务化、商业化应用阶段.

除了 GNSS-R 外, 目前较为成熟的海洋定量微波遥感技术主要有微波辐射计、雷达高度计、微波散射计和合成孔径雷达 (SAR), 且各技术在探测机理上均有所不同^[7]. 辐射计为被动遥感, 频率主要在 C~Ka

波段, 主要测量海洋及大气的辐射亮温. 散射计和 SAR 为主动遥感, 频率一般为 L~Ku 波段, 在海面上为后向布拉格散射. 高度计同样为主动遥感, 频率一般为 Ku 波段, 通过向星下点发射雷达信号, 并接收海面上镜面反射后的信号. GNSS-R 为 L 波段的双基雷达外源助动遥感, 在海面上为前向准镜面反射. 各种微波遥感技术在海洋遥感上的探测机理对比见表 1. 从探测机理上来看, GNSS-R 与高度计最为接近, 二者均为镜面反射, 海面越粗糙, 接收信号的能量越弱. 相比之下, 散射计和 SAR 则是海面越粗糙, 回波能量越强. 当然, 除去探测机理, GNSS-R 与高度计也有许多不同之处, 如波束视角、观测轨迹、信号频率、信号体制、极化等^[8,9].

有效波高是一种重要的海浪参数, 代表着实际波高的统计值, 定义为将波高按照大小顺序排列后, 前 1/3 波高的平均值, 对于海洋灾害预警和应急管理具有重要意义. 海浪由风浪和涌浪组成, 有效波高为风浪有效波高和涌浪有效波高的叠加. 定量测量有效波高最常见的遥感手段是雷达高度计, 由于信号在海浪的波峰和波谷的反射回波具有不同的时延, 接收信号的前沿斜率即可反映波束视角内海浪高度的统计信息, 进而反演有效波高. 高度计测量有效波高的精度

表 1 各种微波遥感技术在海洋遥感上的探测机理对比
Table 1 Comparison of mechanisms of different microwave ocean remote sensing techniques

探测技术	波段	主被动	探测机理
微波辐射计	C~Ka	被动	测量辐射亮温
散射计/SAR	L~Ku	主动	后向布拉格散射
雷达高度计	Ku	主动	星下点镜面反射
GNSS-R	L	主动	前向准镜面反射

一般在 $0.2\sim0.3\text{ m}$ ^[10-12]. SAR 在海浪模式下可以很好地测量海浪谱, 再通过对海浪谱积分或神经网络等方法也能够推算出有效波高, 精度一般在 0.4 m 左右^[13,14]. 近年来发展出了干涉成像高度计, 如天宫二号, 可以获取宽刈幅海面高度, 反演有效波高的方法与 SAR 基本相同^[15]. 中法海洋卫星上搭载的海浪波谱仪是一种新的海浪探测手段, 可以利用小入射角散射机制测量海浪方向谱. 而在星下点处, 海浪波谱仪与高度计原理相同, 因此也能测量有效波高, 精度约 0.35 m ^[16,17]. 此外, 也有利用散射计数据结合神经网络方法, 以及风浪关系得出效波高的研究, 由于散射计的后向布拉格散射测量的是海浪的微小尺度毛细波, 仅对风速和风浪敏感, 当风浪主导时, 有效波高的反演精度约 0.5 m , 而当涌浪主导时, 精度则降至 0.7 m 以上^[18,19]. 表 2 列出了各种微波遥感技术测量有效波高的卫星/载荷、反演精度、对比数据源和反演方法. 其中对比数据源一般来自浮标、海浪模式和高度计. 总的来说, 目前对有效波高的遥感观测数据较少, 主要是因为高度计和海浪波谱仪只能对卫星星下点观测, 观测仅为条带状, 缺乏宽刈幅测量手段. 而 SAR 由于功耗高, 不能持续观测, 且刈幅窄. 有研究结合散射计与高度计或海浪波谱仪数据, 利用深度学习方法, 构建宽刈幅有效波高, 目前还未得到广泛应用^[20].

星载 GNSS-R 是一种潜在的新型有效波高测量技术, 与高度计相比, GNSS-R 最大的优势在于可以同时利用多个镜面反射点观测, 继而在 $1500\sim2500\text{ km}$ 宽度的刈幅内获得多个条带的观测数据. 由于 GNSS-R 非常适合星座组网探测, 因此能与现有的观测手段形成互补, 提供高时空分辨率的全球有效波高观测数据. 利用星载 GNSS-R 技术反演有效波高的研究较

少, 主要为利用雷达散射截面、波形前沿斜率、后延斜率等作为观测量, 使用非线性拟合或神经网络等方法进行反演, 反演精度一般在 $0.5\sim0.65\text{ m}$ ^[21-23]. 但以上研究并未在探测机理上深入分析, 反演结果与数据质量控制也有较大关系. 并且绝大部分灾害性海浪都发生在高纬度地区, 而过去研究使用的 CYGNSS 卫星仅能覆盖全球纬度 38° 以内的区域, 缺乏对高纬度地区有效波高反演结果的分析. 本文从探测机理上分析利用 GNSS-R 反演有效波高的可行性, 提出了基于波形和基于海面粗糙度的两种技术路线, 再利用风云三号 E 星极轨卫星实测数据分析不同条件下 GNSS-R 观测量与有效波高的敏感性及反演的精度, 为星载 GNSS-R 反演有效波高的业务化应用和未来载荷的设计提供理论与技术支持.

1 观测量与反演原理

1.1 GNSS-R 波形

GNSS-R 的原始观测量为时延多普勒图 (DDM), 是将反射信号与本地码在时延和多普勒上相关后得到的二维功率波形, 如图 1(a) 所示. 提取 DDM 中 0 多普勒处的信息 (或将多个多普勒对应的一维波形平均), 减去噪底并用峰值进行归一化处理后, 即可得到归一化一维时延波形, 如图 1(b) 所示. 图 2^[24] 展示了高度计波形示意图及反演海面高度、海面风速、有效波高的观测量^[24]. 通过比较图 1(b) 和图 2, 可见高度计与 GNSS-R 的波形十分相似. 高度计利用波形跟踪点处的时延反演海面高度, 用波形峰值功率对应的雷达散射截面反演海面风速, 用波形前沿斜率反演有效波高^[25]. 对于测量有效波高, 因海浪存在波峰和波谷, 当信号打在波峰时, 时延减小, 波形提前; 当信号

表 2 各种微波遥感技术测量有效波高的卫星/载荷、反演精度、反演方法和对比数据源
Table 2 Satellite/payload, retrieval accuracy, methods, and comparison datasets from different microwave remote sensing technique in retrieving significant wave height

技术	卫星/载荷	精度/m	反演方法	对比数据源	参考文献
雷达高度计	Jason, Sentinel-3, HY-2	$0.2\sim0.3$	波形前沿斜率	浮标、高度计	[10-12,15]
SAR	Radasat, Sentinel-1等	$0.3\sim0.5$	先反演海浪谱, 再对海浪谱积分或经验模型	浮标、海浪模式	[13,14]
干涉成像高度计	天宫二号	$0.3\sim0.5$	与SAR相同	海浪模式、高度计	[15]
海浪波谱仪	CFOSAT/SWIM	$0.3\sim0.4$	波形前沿斜率	海浪模式、高度计	[16,17]
散射计	ERS-1/2, ASCAT等	$0.5\sim0.72$	雷达散射截面	浮标、海浪模式	[18,19]

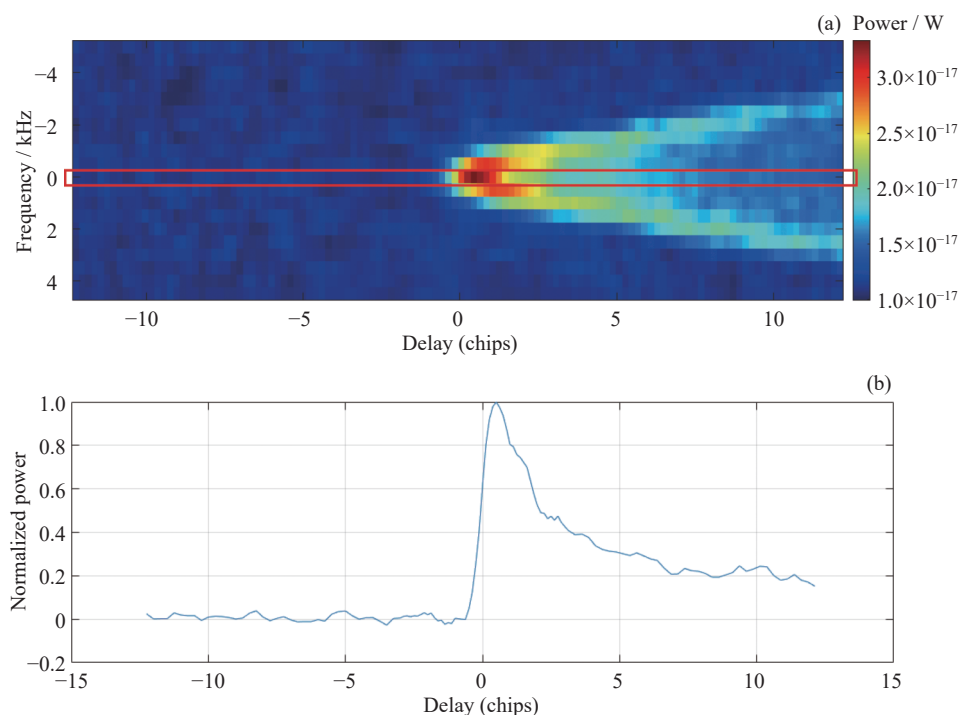


图1 星载 GNSS-R DDM 二维波形 (a) 与从 DDM 中提取的归一化一维波形 (b)

Fig. 1 Spaceborne GNSS-R DDM two-dimensional waveform (a) and the one dimensional waveform extracted from the DDM (b)

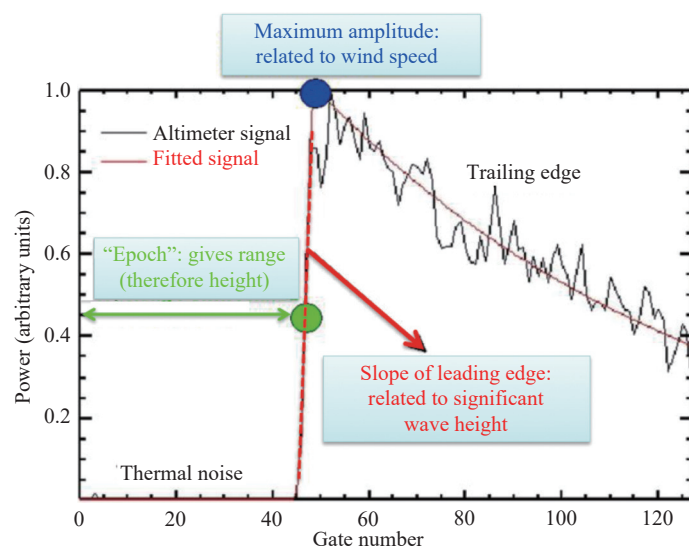


图2 雷达高度计波形及反演海面高度、海面风速、有效波高的观测量

Fig. 2 Radar altimeter waveform and observations of sea surface height, sea surface wind speed and significant wave height

打在波谷时, 时延增加, 波形延后. 海浪越大, 振幅越大, 波形的提前量和延后量越大, 因而波形前沿斜率越大. 由于 GNSS-R 与高度计机理类似, 二者具有相似的回波波形, 且 GNSS-R 测量海面风速和海面高度

的观测量也与高度计几乎完全相同, 因此可推测 GNSS-R 波形前沿斜率也可用于反演有效波高.

1.2 GNSS-R 海面粗糙度

GNSS-R 与散射计的区别主要在于散射机理. 散

射计一般为 C 或 Ku 波段 (波长 < 7 cm) 下的后向布拉格散射, 对海浪表面毛细波 (波长 < 10 cm) 敏感, 主要对局部风速敏感. GNSS-R 为 L 波段 (约 20 cm) 下的前向准镜面反射, 对海浪重力波 (波长 > 50 cm) 敏感, 测量的海面粗糙度同时受涌浪和风浪影响, 且风浪受风速和波龄 (与风区、风时有关) 的影响. 而有效波高为涌浪有效波高和风浪有效波高的叠加, 有

$$H^S = \sqrt{(H_{\text{swell}}^S)^2 + (H_{\text{wind}}^S)^2}. \quad (1)$$

其中, H^S 为有效波高, H_{swell}^S 为涌浪有效波高, H_{wind}^S 为风浪有效波高. 因此, 从测量海面粗糙度的原理来说, GNSS-R 比散射计对有效波高更敏感. GNSS-R 测量的海面粗糙度可用海面均方根坡度 (Mean Square Slope, MSS) 表示, 其可由双基雷达散射截面计算^[26]:

$$M = \frac{|\Re(\theta)|^2}{\sigma^0}. \quad (2)$$

其中, M 为 MSS, $\Re$ 为海面复数菲涅尔反射系数, θ 为入射角, σ^0 为归一化双基雷达散射截面. MSS 在物理上可表示为海浪谱的积分

$$M = \int_0^{k_u} k^2 S(k) dk. \quad (3)$$

其中, k 为海浪的波数, $S(k)$ 为海浪谱, 包含涌浪和风浪的海浪谱. k_u 为截止频率, 与信号的波长 λ 和入射角有关^[27]

$$k_u = \frac{2\pi}{3\lambda} \cos\theta. \quad (4)$$

GNSS-R MSS 的计算以及与涌浪、风浪海浪谱的关系如图 3 所示.

有效波高也同样可以用海浪谱表示^[28], 即

$$H^S = 4\sqrt{\int_0^\infty S(k) dk}. \quad (5)$$

对比式 (2) 与式 (5), 可知 M 和 H^S 都与海浪谱有关, 二者存在相关性, 因此可以用 GNSS-R 测量的海面粗糙度 (表征为归一化雷达散射截面) 反演有效波高.

2 数据与方法

2.1 数据说明

研究使用风云三号 E 星 (FY-3E) GNOS-II 载荷的 GNSS-R 1 级 (L2) 数据和 2 级 (L2) 海面风速数据, 时间为 2022 年 7 月 1—30 日. 由于本文的主要目的是分析 GNSS-R 在不同条件下, 不同观测量对有效波高的敏感性, 因此一个月的数据足以覆盖大部分海况情况. GNOS-II 包括 GPS 和北斗数据, 其中 GPS 为 L1 C/A 信号, BDS 为 B1 I 信号, DDM 时延分辨率为 1/8 码片. 有效波高数据来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA5 再分析模式, 包含有效波高、风浪有效波高、涌浪有效波高和平均海浪周期, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.25°. 将每个 FY-3E 的观测数据插值到 ECMWF 上, 获取对应的有效波高数据, 插值方法为空间上双线性差值、时间上线性差值, 匹配后的有效波范围为 0~8.9 m.

图 4 给出了 2022 年 7 月 28 日 00:00 UT 时 ECWFM ERA5 的整体有效波高、涌浪有效波高、风浪有效波高和平均海浪周期. 可见有效波高存在显著的地域分布规律, 受绕极西风带的影响, 在南半球中高纬区域有效波高明显高于其他地区. 在该地区, 由

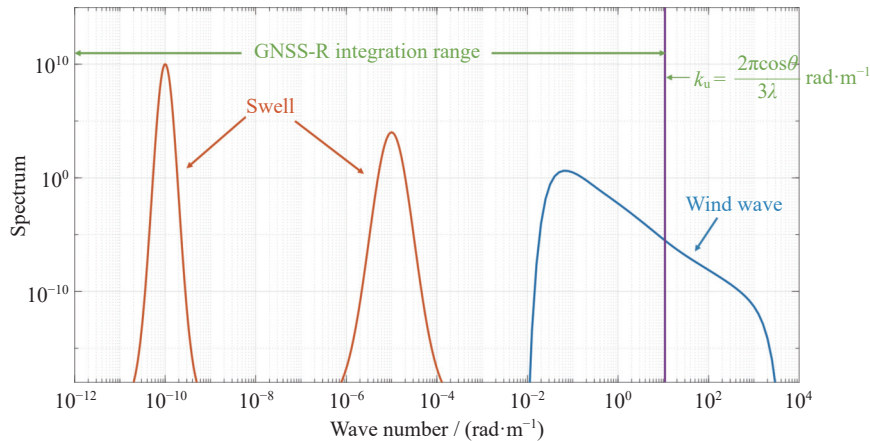


图 3 GNSS-R MSS 的计算以及与涌浪、风浪海浪谱的关系

Fig. 3 Calculation of GNSS-R MSS and its relationship with the spectrums of swell and wind

于风速较大, 风浪一般大于涌浪; 而在全球其他地区, 由于风速较小, 涌浪则大于风浪. 另外, 在台风区域 (约 141°E , 22°N), 也可观察到较大的风浪. 有研究分析, 在气候学上涌浪对有效波高的贡献占 75%^[29]. 平均海浪周期可以用于描述海浪的状态, 周期越大表示海浪越成熟.

2.2 基于波形的反演方法

分别选取 FY-3E 卫星 GNOS-II 载荷与 2022 年 7 月 10 日和 7 月 29 日的一轨数据, 该两轨数据经过了南半球西风带区域的温带气旋, 有效波高范围分别为 $0.5\sim 5\text{ m}$ 和 $2\sim 8\text{ m}$. 对于每一个 DDM 观测波形, 首先如 1.1 节所述得到归一化一维波形, 然后利用一维波形上镜面反射点前后共 5 个采样点线性拟合得到归一化波形前沿斜率 (Leading Edge Slope of Normalized Waveform, NLES), 如图 5 所示. 再根据每

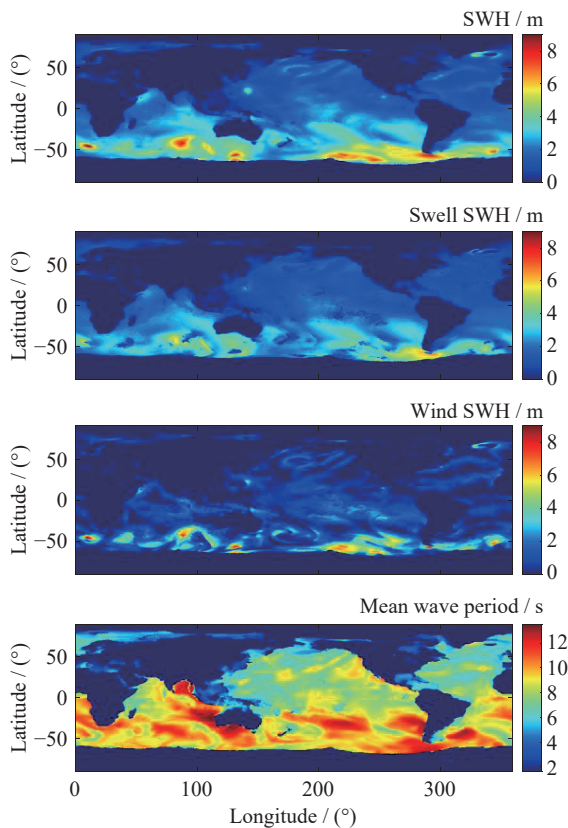


图 4 2022 年 7 月 28 日 00:00 UT 时 ECMWF ERA5 的整体有效波高、涌浪有效波高、风浪有效波高和平均海浪周期

Fig. 4 Total SWH, swell SWH, wind SWH and mean wave period from ECMWF ERA5 at 00:00 UT on 28 July 2022

个 DDM 对应的镜面反射点位置, 与 ECMWF ERA5 有效波高数据进行匹配.

2.3 基于海面粗糙度的反演方法

为分析 GNSS-R 对有效波高的敏感性, 首先对数据进行质量控制, 尽可能排除定标和噪声产生的误差. 由于 GPS 卫星的发射功率误差较大, 为排除数据的定标误差及各导航系统间的交叉定标误差, 本研究只使用北斗反射数据. 另外, 本研究仅使用 L2 数据中质量标识符为 0 及天线增益大于 12 dB 的数据. 经过质量控制后, 剩余约 46 万个 GNSS-R 与有效波高匹配数据. 星载 GNSS-R 与海面粗糙度有关的变量主要为归一化的双基雷达散射截面 (NBRCS) 和雷达散射截面的前沿斜率 (LES). 需要注意的是, 该 LES 与 1.1 和 2.2 节中使用的 NLES 不同, NLES 主要表征的是信号的波形信息, 而该 LES 主要受雷达散射截面绝对大小影响, 主要表征的是海面粗糙度大小.

为了分析 GNSS-R 观测反演有效波高的敏感性, 对于 NBRCS 和 LES 观测, 使用后向传播神经网络的反演方法. 由于 GNSS-R 连续的观测数据之间在时间上存在相关性, 实验中将观测数据前 15 天数据作为训练集, 后 15 天数据作为测试集. 标签为 ERA5 有效波高. 实验中测试了不同复杂度的网络, 网络的特征参数除了 NBRCS 和 LES, 还加入了入射角、方位角、卫星 PRN 号、GNSS-R 反演风速、镜面反射点地理位置等参数进行测试.

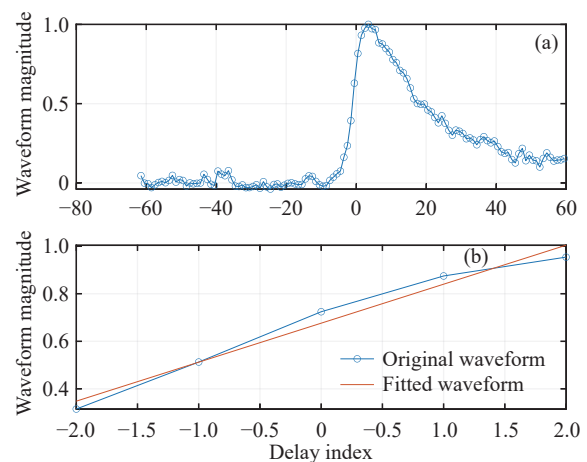


图 5 GNSS-R 一维时延波形 (a) 与镜面反射点附近原始一维时延波形与拟合后波形 (b)

Fig. 5 GNSS-R one dimensional delay waveform (a), GNSS-R original waveform and fitted waveform near the specular point (b)

3 结果与分析

3.1 基于波形的反演结果

图 6 给出了 2022 年 7 月 29 日数据中不同有效波高对应的归一化时延波形的几个例子, 有效波高分别为 1.9, 4.24, 6.53, 8.21 m. 可以看出不同有效波高对应的 NLES 几乎完全相同. 图 7 给出了 2022 年 7 月 10 日和 7 月 29 日两组数据对应的 NLES 与有效波高的散点密度, 同样可见, NLES 对有效波高几乎无敏感性.

因此, 在现有 GNSS-R 的体制下, 其波形无法像高度计一样用于反演有效波高. 这主要是因为 GNSS-R 信号相比高度计带宽较小、时延波形的采样间隔较大. GPS L1 C/A 信号一个码片约 300 m, 1/8 码片的采样间隔对应 37.5 m; BDS B1 I 的码片长度为 GPS 的一半, 1/8 码片对应的采样间隔为 18.75 m. 该采样间隔远大于有效波高的变化动态范围, 因此波形的前沿斜率主要取决于信号自身自相关函数, 而对

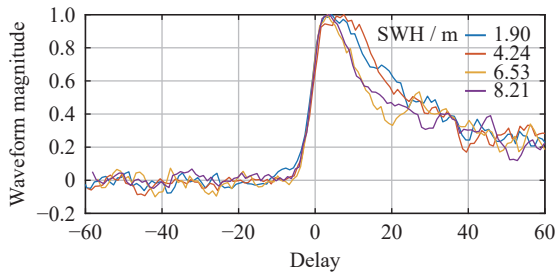


图 6 不同有效波高对应的归一化时延波形

Fig. 6 Normalized delay waveform at different SWH

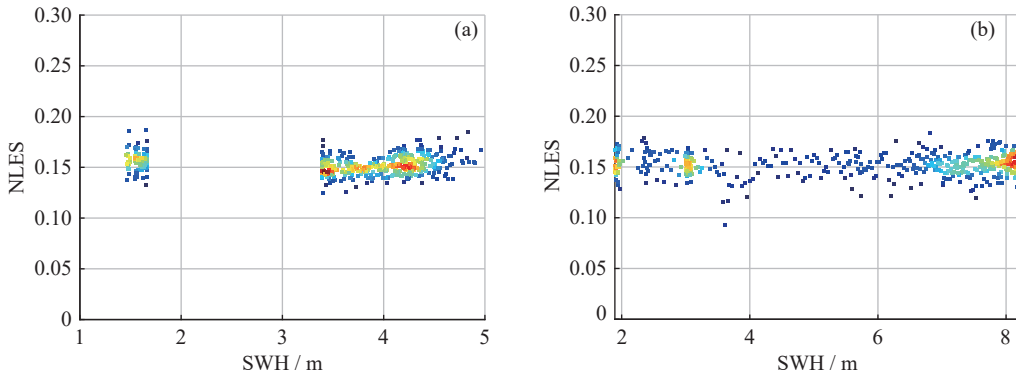


图 7 归一化波形前沿斜率与有效波高的散点密度. (a) 2022 年 7 月 10 日 19:00 UT–20:00 UT 数据, (b) 2022 年 7 月 29 日 13:00 UT–14:00 UT 数据

Fig. 7 Scatter density plots for the comparison between NLES and SWH. (a) Data at 19:00 UT–20:00 UT on 10 July 2022, (b) data at 13:00 UT–14:00 UT on 29 July 2022

有效波高的敏感性不足. 此外, 由于 GNSS-R 为斜向入射, 同样 h 高度的海浪变化引起的信号传播距离变化为 $2h\cos\theta$. 因此入射角 θ 越大, 波形前沿斜率对有效波高的敏感性也越差.

3.2 基于海面粗糙度的反演结果

图 8 和图 9 给出了 FY-3E NBRCs 和 LES 与涌浪有效波高、风浪有效波高和整体有效波高匹配后的散点密度图. 可见 NBRCs 和 LES 对各有效波高的敏感性基本相同, 对风浪有效波高的敏感性最高, 其次是整体有效波, 对涌浪有效波高的敏感性最低.

在实验中, 使用不同特征参数、不同网络复杂度下的神经网络在训练集和测试集上的有效波高均方根误差 (RMSE) 见表 3. 实验 1 使用的特征参数为 NBRCs、LES、入射角 (INC)、方位角 (AZI) 和 GNSS 卫星号 (PRN). 其中, NBRCs 和 LES 包含海面粗糙度信息, 加入入射角和方位角是为了降低天线方向图定标误差的影响, 加入 GNSS 卫星号是为了降低 GNSS 卫星有效全向辐射功率 (EIRP) 的估计误差. 需要说明的是, 此处的 LES 与 3.1 节中的 NLES 不同, 为波形未归一化时的前沿斜率, 主要受信号功率大小影响, 主要反映海面粗糙度信息. 实验 1 使用了双层神经网络, 每层 25 个节点 ([25, 25]), 在训练集和测试集上的有效波高反演精度分别为 0.56 和 0.79 m. 由于测试集误差显著高于训练集误差, 说明网络过于复杂而过拟合. 实验 2 和 3 使用的特征参数与实验 1 相同, 但神经网络的复杂度分别降低为 [10, 10] 和 [5, 5], 两次在测试集上精度相当, 分别为 0.70 和 0.69 m. 实验 4~6 使用的特征参数在实验 1 的基

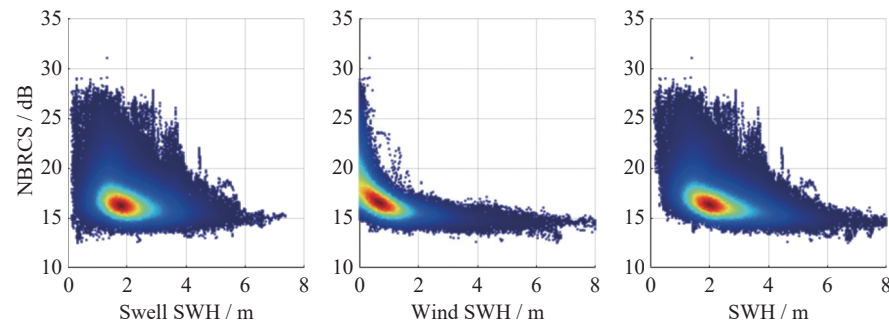


图 8 FY-3E NBRCS 与涌浪有效波高、风浪有效波高、整体有效波高的散点密度
Fig. 8 Density scatter plots for the comparison between FY-3E NBRCS and swell, wind and total SWH

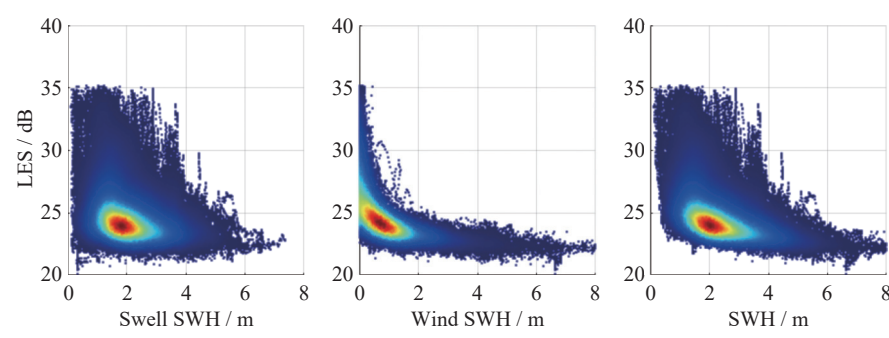


图 9 FY-3E LES 与涌浪有效波高、风浪有效波高、整体有效波高的散点密度
Fig. 9 Density scatter plots for the comparison between FY-3E LES and swell, wind and total SWH

表 3 不同特征参数、不同复杂度下的神经网络在训练集和测试集上的有效波高反演均方根误差 (单位: m)
Table 3 RMSE of neural network in retrieving SWH with different feature parameters and complexity (unit: m)

实验组	特征参数	网络	训练集精度	测试集精度	结果分析
1	NBRCS, LES, INC, AZI, PRN	[25,25]	0.56	0.79	过拟合
2	同实验1	[10,10]	0.65	0.70	
3	同实验1	[5,5]	0.68	0.69	
4	实验1+SWS	[25,25]	0.53	0.77	
5	实验1+SWS	[10,10]	0.64	0.69	
6	实验1+SWS	[5,5]	0.67	0.68	
7	实验1+SWS+Lat+Lon	[25,25]	0.27	0.83	过拟合
8	实验1+SWS+Lat+Lon	[10,10]	0.44	0.55	
9	实验1+SWS+Lat+Lon	[5,5]	0.46	0.52	
10	实验1+SWS+Lat+Lon	[3,3]	0.53	0.55	
11	实验1 +Lat+Lon	[5,5]	0.48	0.54	
12	SWS+Lat+Lon	[5,5]	0.53	0.58	
13	Lat+Lon	[5,5]	0.59	0.69	欠拟合

础上增加了 GNOS-II L2 数据中反演的海面风速 (SWS), 并使用不同复杂度的神经网络进行测试, 结果表明当网络复杂度为 [5, 5] 时精度最高, 约 0.68 m. 实验 7~10 使用的特征参数在实验 4 的基础上增加了镜面反射点的经度和纬度, 结果显示当模型复杂度为 [25, 25] 时过拟合 (测试集精度低于训练集), 在 [3, 3] 时则欠拟合 (训练集和测试集精度都较低), 在 [5, 5] 时精度最高, 为 0.52 m. 实验 11 在实验 9 的基础上

特征参数中去掉了风速, 反演精度为 0.54 m.

以上结果说明, GNSS-R 的 NBRCS 和 LES 等观测测量可以用来反演有效波高. 在特征参数中加入镜面反射点的地理位置信息则对反演精度有明显的提升, 从 0.68 m 降低为 0.52 m. 这主要是因为有效波高的大小在地理空间上有明显的分布特征 (见图 4), 在高纬度地区 (特别是南纬) 明显大于其他地区, 不同地区涌浪和风浪的占比不同也导致了 GNSS-R 观测测量对有效波高敏感性的差异. 在神经网络中加入地理信息, 可使模型利用气候学信息, 提高有效波高的反演精度. 在特征参数中加入 GNSS-R 反演的海面风速时, 反演精度有较小的提升, 从 0.54 m 降低为 0.52 m (使用 ECMWF 模式风速结果无明显区别). 这主要是因为 GNSS-R 测量的 MSS 同时与风速和 SWH 相关, 而 SWH 与涌浪强相关^[30], 因此在特征参数中加入风速信息能提高有效波高的反演精度.

为了进一步验证 GNSS-R 观测测量对反演有效波高的贡献, 实验 12 在特征参数中仅使用 GNSS-R 风速和镜面反射点位置, 实验 13 在特征参数中仅使用了镜面反射点位置. 结果显示, 实验 12 和 13 在测试集上的有效波高反演误差分别为 0.58 和 0.69 m, 大于实验 9 的 0.52 m (将 GNSS-R 风速替换为 ECMWF 模式风速结果也类似). 因此, 在反演有效波高上使用 NBRCS 和 LES 观测测量相比于使用风速和风浪关系效果更好.

图 10 给出了实验 9 反演有效波高与 ECMWF 有效波高的对比的散点密度图, 整体均方根误差为 0.52 m, 在有效波高 4 m 以内时, 均方根误差为

0.46 m. 图 11 展示了 GNSS-R 有效波高反演精度与 ERA5 有效波高大小的关系, 可见从 4 m 开始, 随着有效波高的增大, 反演的偏差和均方根误差都迅速增大. 图 12 展示了 GNSS-R 有效波高反演精度与数据纬度的关系, 可见反演精度与数据纬度也有较大关系, 在纬度 $-20^{\circ}-40^{\circ}$ 内精度较高, 优于 0.4 m, 在高纬度地区, 特别是南半球精度较差, 这主要与南半球的高海况有关. 图 13 展示了 GNSS-R 有效波高反演精度与平均海浪周期的关系, 可见平均海浪周期在 7 s 以内时, 反演精度与平均海浪周期基本无关, 稳定在 0.5 m 左右; 当平均海浪周期大于 7 s 时, 反演均方根误差和偏差迅速增大. 这说明当海浪较为成熟时, GNSS-R 反演有效波高精度降低.

总体来说, 在对数据进行较严格质量控制的情况下, 基于海面粗糙度 GNSS-R 反演有效波高精度为 0.50~0.55 m, 且在高海况和涌浪主导时精度降低, 该精度低于高度计. 这主要原因有两点: 第一, 利用 GNSS-R 海面粗糙度测量有效波高是一种间接的方式, 并非像高度计一样直接利用距离来测量, 而在高海况时海面粗糙度对有效波高的敏感性降低; 第二, 虽然 GNSS-R 测量的海面粗糙度对涌浪有一定的敏感性, 但其主要部分还是来自高频的风浪信息. 通过对比式 (3) 和式 (5), 同为对海浪谱的积分, MSS 相比 H^S 在积分时多了一个 k^2 的系数, 因此对 k 较大数值的海浪成分 (主要为风浪) 的敏感性高于 k 较小数值的海浪成分 (主要为涌浪). 而如 2.1 节中分析所得, 对有效波高的贡献中, 涌浪一般高于风浪, 因此, 该方法在涌浪主导时存在一定的局限性.

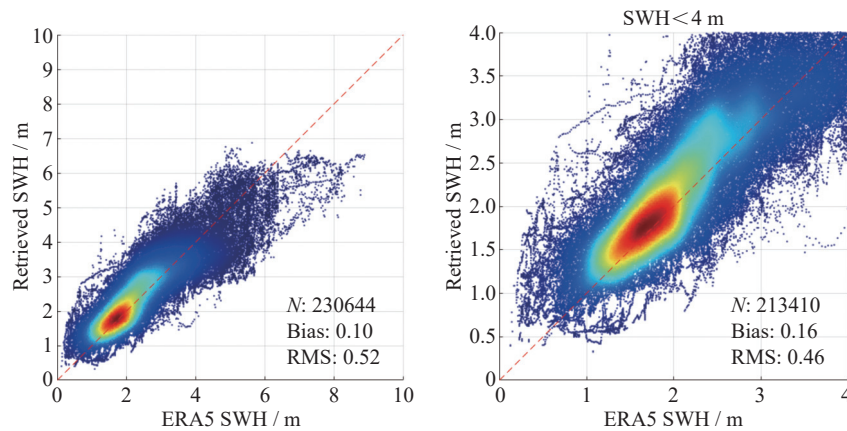


图 10 GNSS-R 反演有效波高与 ECMWF ERA5 有效波高对比的散点密度. (a) 整体对比, (b) 4 m 以下对比

Fig. 10 Density scatter plots for the comparison of between SWH retrieved by GNSS-R and ECMWF ERA5 SWH. (a) Overall comparison, (b) SWH under 4 m

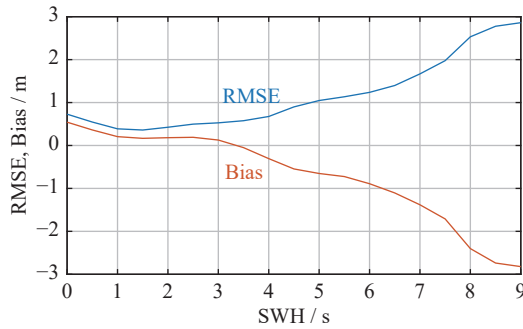


图 11 GNSS-R 有效波高反演精度与 ERA5 有效波高的关系

Fig. 11 SWH retrieval statistics as a function of ERA5 SWH

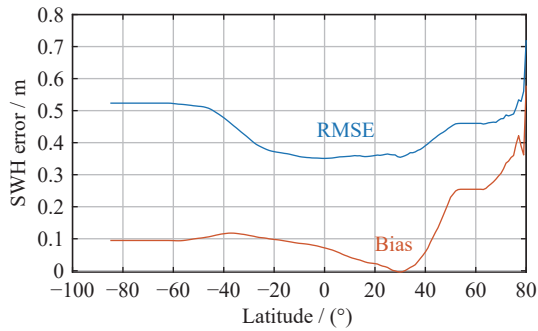


图 12 GNSS-R 有效波高反演精度与数据纬度的关系

Fig. 12 GNSS-R SWH retrieval statistics as a function of data latitudes

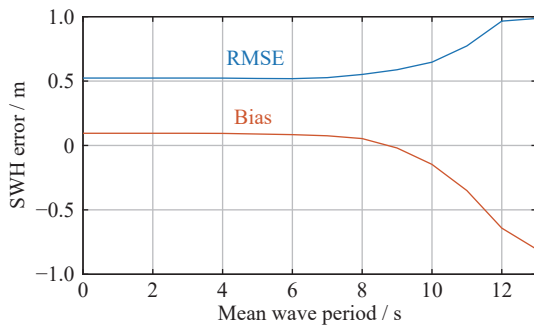


图 13 GNSS-R 有效波高反演精度与海浪平均周期的关系

Fig. 13 GNSS-R SWH retrieval statistics as a function of mean wave period

4 结论

本文将星载 GNSS-R 技术与其他微波遥感技术进行了对比, 提出了两种 GNSS-R 反演有效波高的方法, 并结合理论与实测数据分析了两种方法对应的观

测量对有效波高的敏感性. 第一种方法为基于海浪影响传播距离变化, 即 GNSS-R 归一化时延波形前沿斜率的直接测量方法. 但由于目前 GNSS-R 体制的信号带宽较小, 测距精度不足, 该方法无法用于反演有效波高. 针对未来利用高带宽 GNSS 信号的体制 (例如干涉模式等), 该方法有潜力得到应用. 第二种方法基于海浪影响海面粗糙度, 利用 GNSS-R 归一化雷达散射截面来反演有效波高. 实验结果表明, 在较好数据质量控制的情况下, 该方法的反演精度为 0.5~0.55 m. 但由于该方法为间接测量, 存在高海况时敏感性下降、涌浪主导时精度降低等问题.

虽然目前 GNSS-R 反演有效波高的精度略低于高度计等传统技术, 但由于 GNSS-R 具有低成本、高覆盖、不受降雨影响、刈幅宽等优势, 可作为一种较好的获取海洋有效波高的补充手段.

参考文献

- [1] ZAVOROTNY V U, GLEASON S, CARDELLACH E, *et al.* Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, **2**(4): 8-45
- [2] MAYERS D R, RUF C S, WARNOCK A M. CYGNSS storm-centric tropical cyclone gridded wind speed product[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2023, **62**(3): 329-339
- [3] WARNOCK A M, RUF C S, RUSSEL A, *et al.* CYGNSS level 3 merged wind speed data product for storm force and surrounding environmental winds[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, **17**: 6189-6200
- [4] MUELLER M J, ANNANE B, LEIDNER S M, *et al.* Impact of CYGNSS-derived winds on tropical cyclone forecasts in a global and regional model[J]. *Monthly Weather Review*, 2021, **149**(10): 3433-3447
- [5] SUN Y Q, HUANG F X, XIA J M, *et al.* GNOS-II on Fengyun-3 satellite series: exploration of multi-GNSS reflection signals for operational applications[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(24): 5756
- [6] JALES P, CARTWRIGHT J, TALPE M, *et al.* Spire global's operational GNSS-reflectometry constellation for earth surface observations[C]//Proceedings of 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE, 2023: 884-887
- [7] HAUSER D, ABDALLA S, ARDHUIN F, *et al.* Satellite remote sensing of surface winds, waves, and currents: where are we now?[J]. *Surveys in Geophysics*, 2023, **44**(5): 1357-1446
- [8] AMANI M, GHORBANIAN A, ASGARIMEHR M, *et al.* Remote sensing systems for ocean: a review (Part 1: pass-

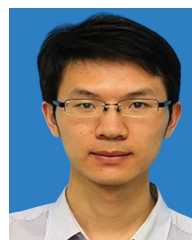
- ive systems)[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, **15**: 210-234
- [9] AMANI M, MOHSENI F, LAYEGH N F, *et al.* Remote sensing systems for ocean: a review (Part 2: active systems)[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, **15**: 1421-1453
- [10] QUEFFEULOU P. Long-term validation of wave height measurements from altimeters[J]. *Marine Geodesy*, 2004, **27**(3/4): 495-510
- [11] JIA Y J, YANG J G, LIN M S, *et al.* Global assessments of the HY-2B measurements and cross-calibrations with Jason-3[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(15): 2470
- [12] JIA Yongjun, ZHANG Youguang, LIN Mingsen. Verification of HY-2 satellite radar altimeter wind retrieval[J]. *Strategic Study of CAE*, 2014, **16**(6): 54-59 (贾永君, 张有广, 林明森. HY-2 卫星雷达高度计风速反演验证 [J]. *中国工程科学*, 2014, **16**(6): 54-59)
- [13] STOPA J E, MOUCHE A. Significant wave heights from Sentinel-1 SAR: validation and applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, **122**(3): 1827-1848
- [14] QUACH B, GLASER Y, STOPA J E, *et al.* Deep learning for predicting significant wave height from synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(3): 1859-1867
- [15] REN L, YANG J S, DONG X, *et al.* Preliminary significant wave height retrieval from interferometric imaging radar altimeter aboard the Chinese Tiangong-2 space laboratory[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(12): 2413
- [16] YE J, WAN Y, DAI Y S. Quality evaluation and calibration of the SWIM significant wave height product with buoy data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, **40**(10): 187-196
- [17] HAUSER D, TOURAIN C, HERMOZO L, *et al.* New observations from the SWIM radar on-board CFOSAT: instrument validation and ocean wave measurement assessment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(1): 5-26
- [18] GUO J, HE Y J, PERRIE W, *et al.* A new model to estimate significant wave heights with ERS-1/2 scatterometer data[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, **27**(1): 112-116
- [19] WANG H, YANG J S, ZHU J H, *et al.* Estimation of significant wave heights from ASCAT scatterometer data via deep learning network[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(2): 195
- [20] WANG J K, AOUF L, DALPHINET A, *et al.* The wide swath significant wave height: an innovative reconstruction of significant wave heights from CFOSAT's SWIM and scatterometer using deep learning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(6): e2020GL091276
- [21] BU J W, YU K G. Significant wave height retrieval method based on spaceborne GNSS reflectometry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1503705
- [22] WANG C Y, YU K G, ZHANG K F, *et al.* Significant wave height retrieval based on multivariable regression models developed with CYGNSS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 4200415
- [23] WANG F, YANG D K, YANG L. Retrieval and assessment of significant wave height from CYGNSS mission using neural network[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(15): 3666
- [24] GÓMEZ-ENRI J, VIGNUDELLI S, QUARTLY G, *et al.* Bringing satellite radar altimetry closer to shore[C]//Proceedings of SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. SPIE, 2009: 1-3
- [25] ROSMORDUC V, BENVENISTE J, BRONNER E, *et al.* Radar altimetry tutorial[G/OL]. <http://www.altimetry.info>, 2011: 112-128
- [26] HUANG F X, GARRISON J L, LEIDNER S M, *et al.* A forward model for data assimilation of GNSS ocean reflectometry delay-doppler maps[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(3): 2643-2656
- [27] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(2): 951-964
- [28] CHEN- ZHANG D D, RUF C S, ARDHUIN F, *et al.* GNSS-R nonlocal sea state dependencies: model and empirical verification[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, **121**(11): 8379-8394
- [29] SEMEDO A, SUŠELJ K, RUTGERSSON A, *et al.* A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40[J]. *Journal of Climate*, 2011, **24**(5): 1461-1479
- [30] LIN W M, PORTABELLA M, FOTI G, *et al.* Toward the generation of a wind geophysical model function for spaceborne GNSS-R[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(2): 655-666

作者简介



黄飞雄 男, 1992 年 4 月出生于湖北省武汉市, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为星载 GNSS-R 数据定标、海洋遥感及其同化应用。

E-mail: huangfeixiong@nssc.ac.cn



夏俊明 男, 1986 年 2 月出生于河南省新乡市, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为 GNSS 反射信号遥感技术与应用。

E-mail: xiajunming@nssc.ac.cn